УДК 621.311.001

АДАПТИРУЕМАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый

Томский политехнический университет
E-mail: Svech@tpu.ru

Представлены результаты синтеза адаптируемой математической модели систем возбуждения синхронных машин, позволяющей адекватно воспроизводить разнообразные системы возбуждения с различными законами регулирования. Приведены сведения о практической проверке математической модели.

Достоверность моделирования нормальных и аварийных процессов в оборудовании и энергосистемах (ЭЭС), наряду с прочими факторами, в значительной мере зависит от точности воспроизведения систем возбуждения (СВ) синхронных электрических машин, особенно крупных синхронных генераторов. Однако жесткость и дифференциальный порядок точной математической модели СВ существенно выше аналогичных характеристик математической модели собственно электрической машины. Поэтому при моделировании реальных энергосистем возникают значительные трудности численного интегрирования чрезвычайно жестких и высокоразмерных систем дифференциальных уравнений, что вынуждает применять упрощенные модели СВ.

Разработанная в НИЛ «Моделирование ЭЭС» ТПУ многопроцессорная программно-техническая система реального времени гибридного типа не накладывает практически никаких ограничений на используемые математические модели. Становится возможным значительное повышение достоверности моделирования за счет применения высокоточных моделей всех элементов ЭЭС и соответственно СВ. В связи с этим поставлена задача синтезировать адаптируемую математическую модель СВ, позволяющую адекватно воспроизводить различные системы возбуждения.

В настоящее время, наряду с современными, основанными на использовании бесщеточных возбудителей, тиристорных управляемых выпрямителей и автоматических регуляторов возбуждения сильного действия (АРВ-СД), эксплуатируются различные СВ с высокочастотными и обычными электромашинными возбудителями с автоматическими регуляторами пропорционального действия (АРВ-ПД), реализующими принципы управляемого компаундирования, в частности фазового, и регулирования по отклонению напряжения. Разработанные в разное время, на различных принципах и разнотипной элементной базе перечисленные СВ имеют существенно отличающиеся математические модели.

Для выяснения особенностей и различий этих СВ был произведен анализ схем и законов регулирования практически всех известных в настоящее время СВ: типа РВА-62 (УБК-3), ЭПА-141, 142, 151, 161, 162, 305, 325, 325Б, 325В, ПРВ-401, АРВ-300И, АРВ-СДП(1) и др., а также опубликованных результатов их исследования [1–3]. Полученные данные позволили сформировать для каждого из них подробные операторные схемы, на базе которых с учетом возможной модификации и развития данных СВ синтезирована адаптируемая математическая модель СВ, учитывающая все влияющие факторы.

Результаты синтеза в наглядной и удобной для использования форме приведены на рис. 1. Представленная на этом рисунке операторная схема отражает все нелинейные ограничения и функционально взаимосвязанные передаточные функции:

$$\frac{U_{\tau_Б}}{U_\Delta}=\frac{1-12\tau_Б p}{12+6\tau_Б p+\tau_Б^2 p^2}$$

– запаздывания, воспроизводимого аппроксимацией Паде второго порядка и собственно

$$\frac{U_Б}{U_{\tau_Б}}=\frac{K_Б}{1+T_Б p}$$

– быстродействующего канала отклонения напряжения (КОН);

$$\frac{U_ф}{U_\Delta}=\frac{1}{1+T_ф p}$$

– фильтра нижних частот и

$$\frac{U_И}{U_ф-K_0(U_И+U_Б)}=\frac{K_И}{T_И p}$$

– собственно интегратора интегрирующего КОН статора;

$$\frac{U_{1U}}{U_{0U}}=\frac{T_{1U}\,p}{1+T'_{1U}\,p+T''_{1U}\,p^2}$$

– регулирования возбуждения по первой производной напряжения статора и

$$\frac{I_{1I_f}}{I_f}=\frac{T_{1I_f}\,p}{1+T'_{1I_f}\,p+T''_{1I_f}\,p^2+T'''_{1I_f}\,p^3}$$

– по первой производной тока возбуждения;

$$\frac{U_\omega}{\omega}=e^{-\tau_\omega p}\approx\frac{1-12\tau_\omega p}{12+6\tau_\omega p+\tau_\omega^2 p^2}$$

– запаздывания и

$$\frac{U_{БЧ}}{U_\omega}=\frac{T_\omega p}{1+T'_\omega p+T''_\omega p^2+T'''_\omega p^3}$$

– собственно блока измерения и преобразования частоты;

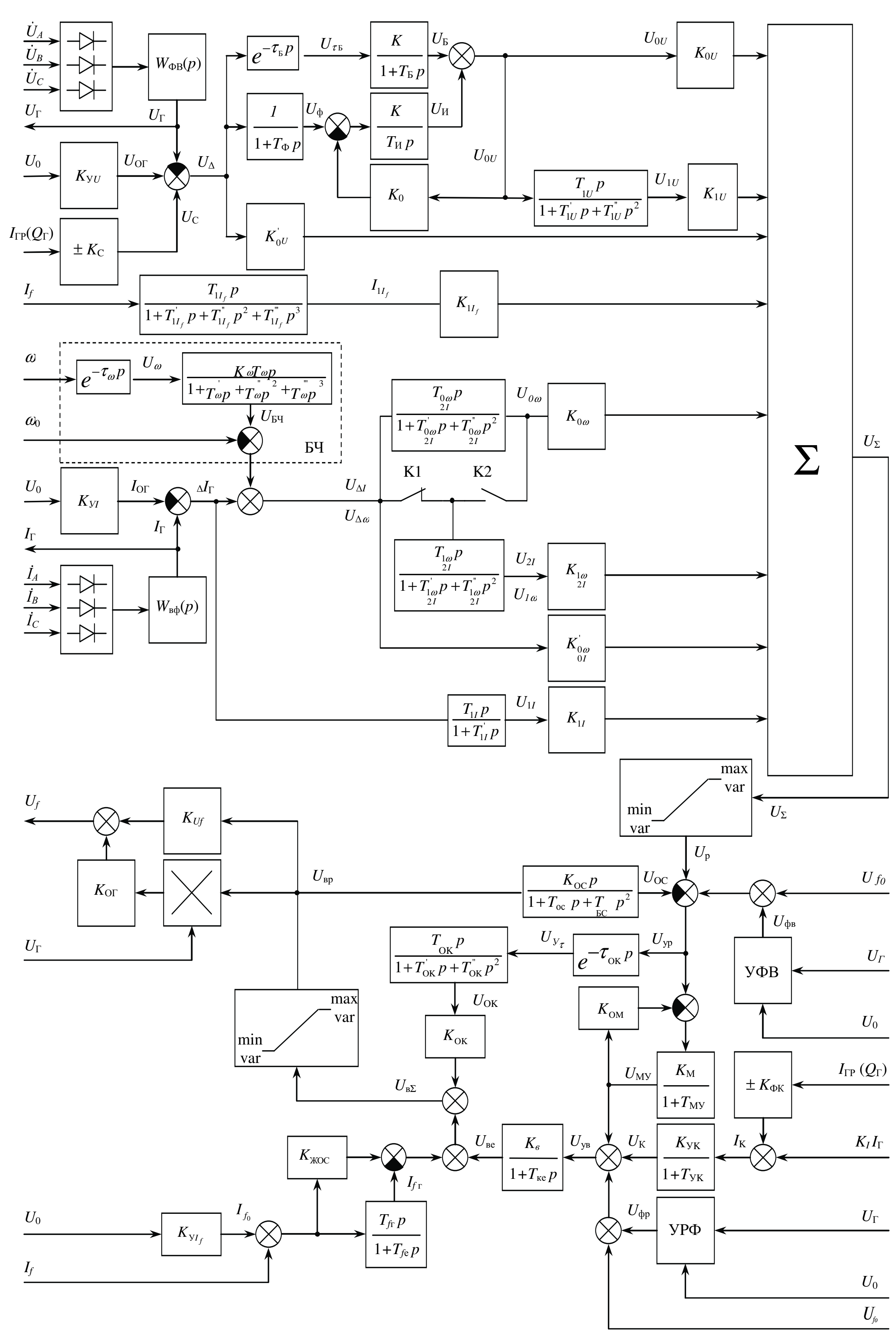


Рис. 1. *Функциональная операторная схема универсальной математической модели СВ*

$$\frac{U_{O\omega}}{U_{\Delta\omega}} = \frac{T_{O\omega}\,p}{1+T'_{O\omega}\,p+T''_{O\omega}\,p^2}$$

– регулирования возбуждения по отклонению частоты и

$$\frac{U_{1\omega}}{U_{\Delta\omega}} = \frac{T_{1\omega}\,p}{1+T'_{1\omega}\,p+T''_{1\omega}\,p^2}$$

– по первой производной частоты;

$$\frac{U_{\substack{1\omega\\2I}}}{U_{\substack{\Delta I\\\Delta\omega}}} = \frac{T_{\substack{1\omega\\2I}}\,p^2}{1+T'_{\substack{1\omega\\2I}}\,p+T''_{\substack{1\omega\\2I}}\,p^2+T'''_{\substack{1\omega\\2I}}\,p^3+T^{IV}_{\substack{1\omega\\2I}}\,p^4}$$

– канала регулирования по второй производной тока статора, а также соответствующего немодифицированного канала регулирования по частоте;

$$\frac{U_{у\tau}}{U_{ур}} = e^{-\tau_{0К}\,p} \approx \frac{1-12\tau_{0К}\,p}{12+6\tau_{0К}+\tau_{0К}^2\,p^2}$$

– запаздывания и

$$\frac{U_{0К}}{U_{у\tau}} = \frac{T_{0К}\,p}{1+T'_{0К}\,p+T''_{0К}\,p^2}$$

– собственно общего канала регулирования возбуждения;

$$\frac{U_{МУ}}{U \quad - K_{ОМ}U_{МУ}} = \frac{K_{МУ}}{1+T_{МУ}\,p}$$

– магнитного усилителя электромагнитного корректора напряжения;

$$\frac{U_{ве}}{U_{ув}} = \frac{K_{в}}{1+T_{ке}\,p}$$

– возбудителя;

$$\frac{U_{К}}{I_{К}} = \frac{K_{УК}}{1+T_{УК}\,p}$$

– канала компаундирования;

$$\frac{I_{f\,г}}{I_{f\Delta}} = \frac{T_{f\,г}\,p}{1+T_{fe}\,p}$$

– гибкой отрицательной обратной связи (ОС) по току возбуждения;

$$\frac{U_{ОС}}{U_{вр}} = \frac{K_{ОС}\,p}{1+T_{ОС}\,p+T_{БС}\,p^2}$$

– общей гибкой ОС; $K_{ОМ}$ – внутренней жесткой ОС магнитного усилителя; УРФ – звена релейной форсировки и расфорсировки возбуждения; K_{Ir} – компаундирования по полному току статора; $K_{ФК}$ – фазового компаундирования, что соответствует акцентному регулированию по реактивному току $I_{ГР}$ или реактивной мощности $Q_{Г}$; $K_{С}$ – статизма корректора напряжения; $K_{уU}$ – уставки по напряжению статора; $K_{уIf}$ – уставки тока возбуждения; $K_{ЖОС}$ – жесткой положительной ОС по току возбуждения; K_{0U} – канала регулирования по отклонению напряжения статора; $K'_{\substack{0\omega\\0I}}$ – регулирования по отклонению частоты или по отклонению тока статора; K_{0}=(0...1) – жесткой отрицательной ОС интегрирующего канала отклонения

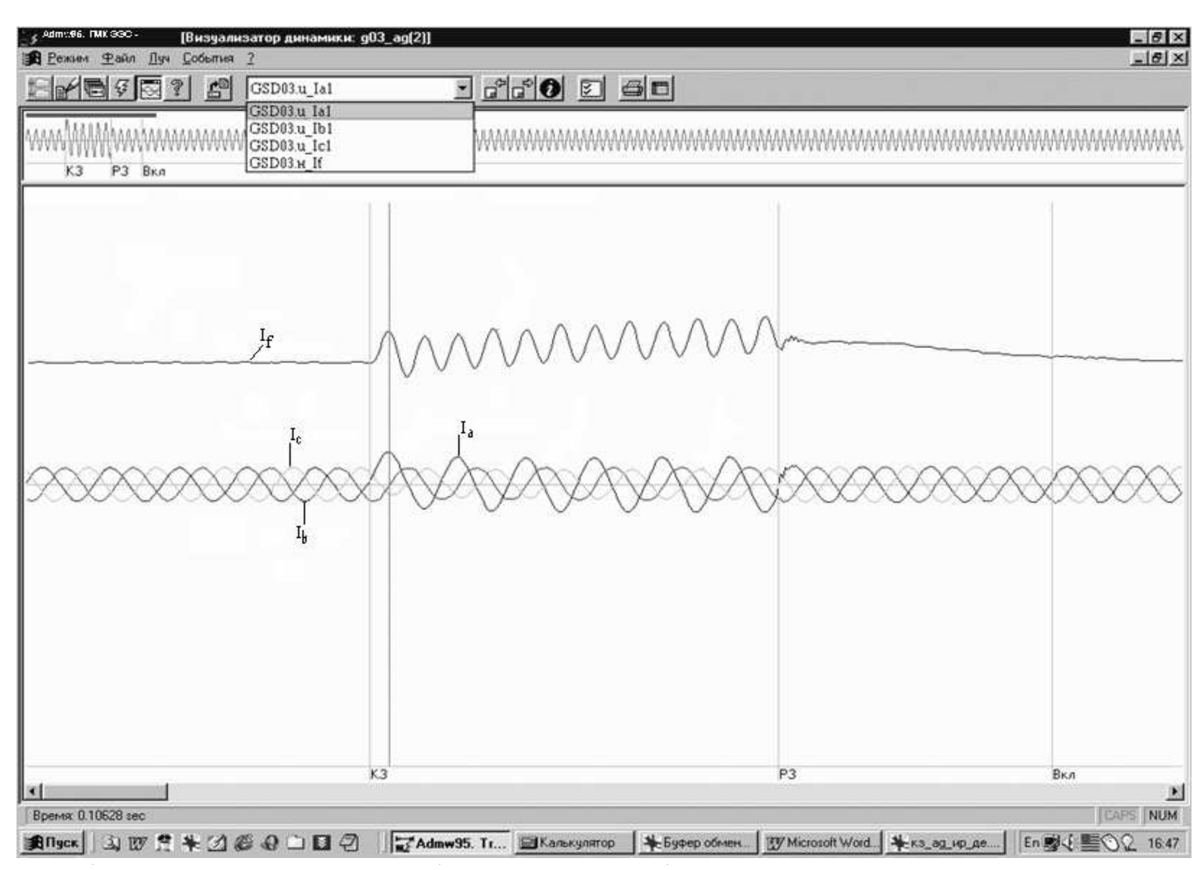


Рис. 2. *Фазные токи и ток возбуждения энергоблока 800 МВт Сургутской ГРЭС-2 при однофазном коротком замыкании в сети*

напряжения; K_{1U}, K_{1If}, $K_{1\omega}$ – каналов регулирования возбуждения по первой производной напряжения статора, по первой производной тока возбуждения и по первой производной частоты или по второй производной тока статора, соответственно.

Обычная замена передаточных функций соответствующими дифференциальными уравнениями с учетом указанных в операторной схеме функциональных взаимосвязей и нелинейных ограничений, приводит к моделе СВ в виде системы уравнений. Варьируя параметры, коэффициенты уравнений и обнуляя соответствующие из них, данную модель можно адаптировать для воспроизведения любых известных СВ, а также произвольного вида с целью модернизации и исследования новых СВ.

Адекватность различных адаптаций полученной математической модели конкретным типам эксплуатируемых в настоящее время СВ надежно подтверждена опытом их использования в составе всережимных гибридных моделирующих комплексов электроэнергетических систем (ГМК ЭЭС) реального времени, созданных в НИЛ «Моделирование ЭЭС», в частности для ОАО «Тюменьэнерго». Все эти результаты докладывались и обсуждались на совещаниях и конференциях, в том числе на Международном симпозиуме в Японии [4–7].

На рис. 2–5 приведены примеры из опыта эксплуатации разработанной модели СВ в составе ГМК ЭЭС, подтверждающие ее практическую адекватность при воспроизведении различных ава-

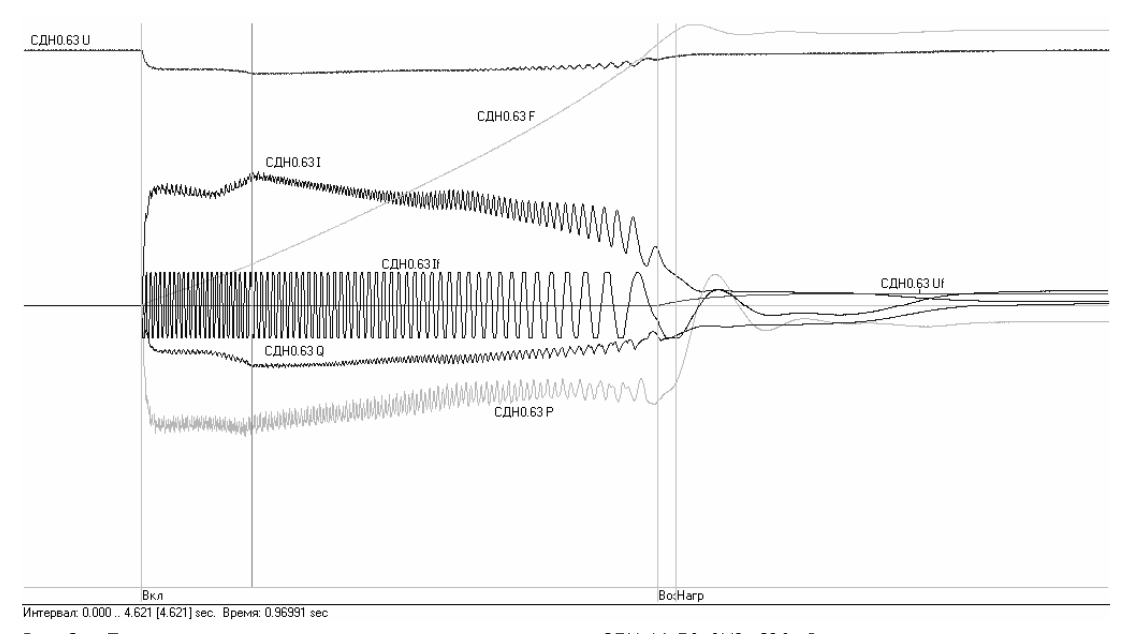


Рис. 3. *Процесс нормального пуска синхронного двигателя СДН-14-59-8У3, 630 кВт*

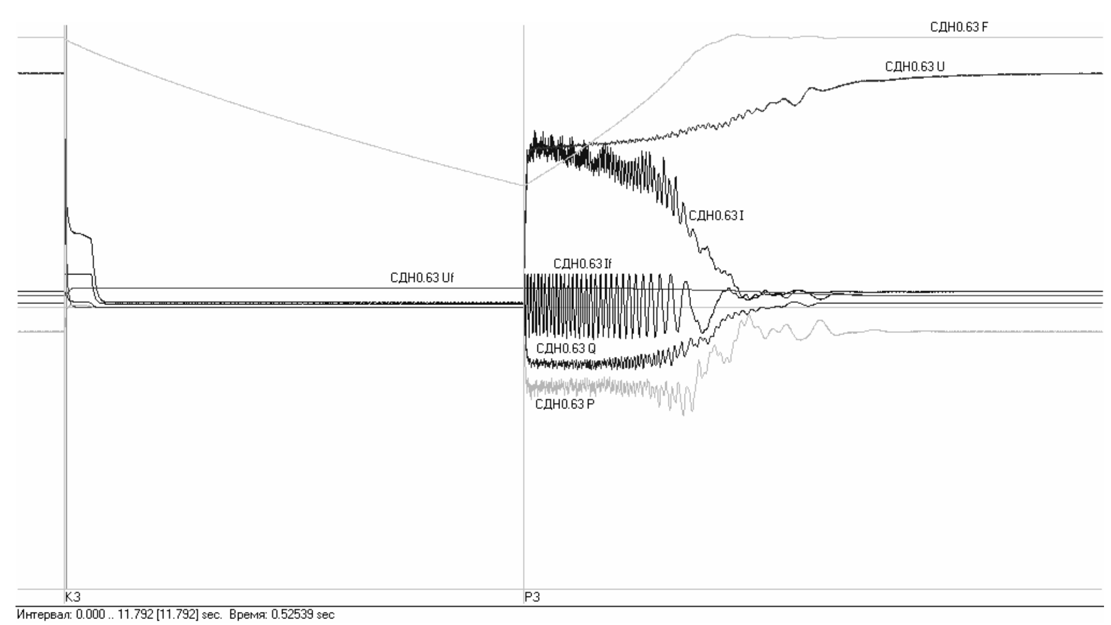


Рис. 4. *Процесс самозапуска СДН-14-59-8У3, 630 кВт при снижении напряжения в результате короткого замыкания и последующем его восстановлении*

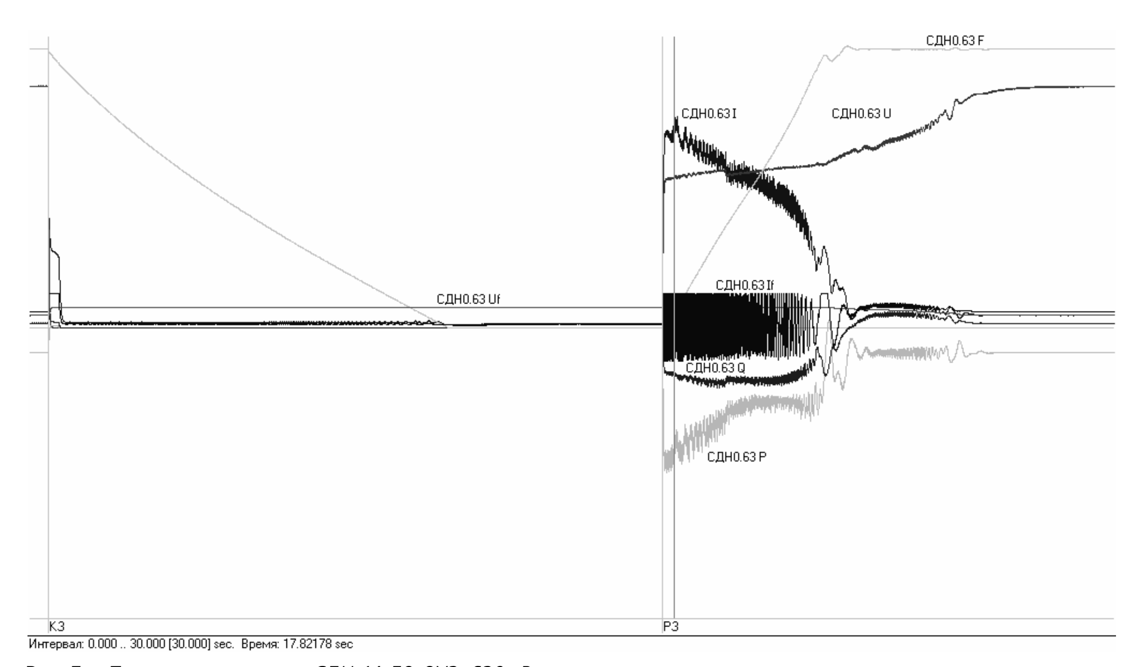


Рис. 5. *Процесс самозапуска СДН-14-59-8У3, 630 кВт после его останова в результате длительного короткого замыкания и последующего восстановления напряжения*

рийных процессов, в которых осциллограммы тока возбуждения I_f наиболее наглядно иллюстрируют достоверность моделирования.

Необходимость радикального повышения достоверности математического моделирования режимов и процессов в ЭЭС, являющегося, в силу их известной специфики, основным способом получения этой информации, диктуется постоянно большим числом тяжелых аварий, причиной примерно 50 % которых прямо или косвенно служит неполная и недостаточно достоверная указанная информация, используемая на этапах проектирования, эксплуатации и развития энергосистем. В частности, многочисленными исследованиями и опытом эксплуатации доказана непосредственная зависимость достоверности определения колебательной устойчивости режимов ЭЭС от точности математических моделей СВ.

Заключение

Разработана и надежно проверена на практике адаптируемая математическая модель системы возбуждения синхронных машин, позволяющая с необходимой точностью моделировать все известные системы возбуждения с учетом автоматических регуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамм Б.З. Влияние точности схемы замещения регулятора возбуждения сильного действия на электромеханические переходные процессы синхронных машин // Труды СИБНИИЭ: Переходные процессы и режимы работы электроэнергетических систем. – М.: Энергия, 1973. – Вып. 24. – С. 79–84.
2. Автоматическое регулирование и управление в энергосистемах // Труды ВЭИ. – М.: Энергия, 1977. – Вып. 83. – 160 с.
3. Покровский М.И., Любарская Н.В. Математическое описание полупроводникового регулятора возбуждения сильного действия для расчетов статической и динамической устойчивости // Труды ВЭИ. – М.: Энергия, 1980. – С. 27–30.
4. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. О применении гибридного моделирующего комплекса электроэнергетической системы для наладки станций возбуждения турбогенераторов // Электроэнергия и будущее цивилизации: Матер. Междунар. научно-техн. конф. – Томск: Томский государственный университет, 2004. – С. 329–330.
5. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Гибридный моделирующий комплекс ЭЭС: результаты разработки, исследования и опытной эксплуатации // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сб. трудов III Всеросс. научно-техн. конф. с междунар. участием в 2 т. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2003. – Т. 1. – С. 216–222.
6. Gusev A.S., Svechkarev S.V., Plodisty I.L. The problem of power system modeling, the concept hybrid solution // The 10th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symp. in Large Scale Systems: Theory and Applications (LSS 2004). – Japan, Osaka, Osaka International Convention Center, July 26–28, 2004. – V. 1. – P. 440–445.
7. Gusev A.S., Svechkarev S.V., Plodisty I.L. Basic aspects of modeling problem for electrical power systems, perspectives and metods of their solution // 9th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology (KORUS 2005). – Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, June 26–July 2, 2005. – P. 322–326.